# 油菜播种机除尘式播量监测系统设计与试验

李　强[1,2], 余秋丽[1,2], 李浩鹏[1,2], 徐春保[1,2], 丁幼春[1,2*]

(1. 华中农业大学 工学院,湖北武汉 430070,中国; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,湖北武汉 430070,中国)

**摘　要:** [**目的/意义**] 针对气送式油菜直播机作业过程中粉尘影响种子流检测性能、监测系统难以适应不同幅宽播种行数等问题，设计了一种油菜播种机除尘式播量监测系统。[**方法**] 该监测系统由除尘式油菜种子流检测装置与播量监测终端构成，可通过改变检测装置数量适配不同幅宽播种机。根据粉尘影响种子流检测结构机制，设计了防尘除尘机构。该机构通过透明防尘板将光电感应器件与导种管隔开，粉尘只附着在透明防尘板靠近导种管一侧，同时利用步进电机-丝杆机构使透明防尘板与除尘布产生相互摩擦实现对透明防尘板除尘。通过分析与试验确定透明防尘板尺寸、除尘启动阈值等关键参数。[**结果和讨论**] 检测装置对比台架试验表明，在平均排种频率12.4～36.3 Hz、平均粉尘流量252～386 mg/s下，无防尘除尘检测装置在两个除尘周期后检测准确率不高于80.2%；有防尘除尘检测装置在单个除尘周期内平均检测准确率不低于93.6%，检测装置不会将粉尘误计。播量监测台架试验表明，在平均排种频率不高于37.6 Hz时，播量监测准确率不低于92.2%。田间播种试验表明，在2.8～4.6 km/h的油菜直播机正常作业速度下，田间排种频率为14.8～31.1 Hz时，播量监测准确率不低于93.1%。[**结论**] 该油菜播量监测系统为气送式油菜直播机作业中粉尘影响下种子流精准检测提供了有效支持，提高了对不同宽幅播种行数的适应性。

**关键词:** 油菜种子流检测；播种；除尘；监测系统；精准计数

**中图分类号:** S24　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** SA202401011

引用格式:李强, 余秋丽, 李浩鹏, 徐春保, 丁幼春. 油菜播种机除尘式播量监测系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 107-117. DOI：10.12133/j.smartag.SA202401011

LI Qiang, YU Qiuli, LI Haopeng, XU Chunbao, DING Youchun. Design and Test of Dust Removal Seeding Rate Monitoring System for Rapeseed Seeders[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 107-117. DOI：10.12133/j.smartag.SA202401011 (in Chinese with English abstract)

## 0　引　言

油菜是中国重要的油料作物，在保障粮油安全、增加农民收入等方面发挥重要作用[1]。播种作为油菜生产过程的重要环节，播种质量直接影响油菜的生长发育，需按照相应农艺要求适时、适量地完成播种作业[2]。气送式排种系统具有高速高效、结构轻简和通用性好等特点，逐步应用于农业生产[3]。气送式油菜直播机在播种过程中，粉尘在气流作用下易附着在感应器件表面而影响对油菜籽检测灵敏度，导致对油菜籽检测难度较大，检测准确率不足。因此研究一种油菜播种机除尘式播量监测系统对于实现气送式油菜直播机播种过程中的播量监测，提高气送式油菜直播机智能化水平具有重要意义。

相关播种机械的发展推动了播种监测技术与装备的发展。国内外众多专家学者和企业主要利用电容检测法[4]、视觉检测法[5]、压电检测法[6,7]、光电检测法[8,9]等技术手段对多种作物的播种监测方面开展了大量研究。Taghinezhad等[10]通过矩形平行电容极板构建甘蔗排种器播种监测系统，实现了对甘蔗播种粒距均匀性监测。Gierz和Paszkiewicz[11]利用聚偏二氟乙烯（Poly Vinyli Dene Fluoride, PVDF）薄膜设计了一种压电传感检测系统，实现了谷物计数和堵塞检测。Borja等[12]基于图像

收稿日期：2024-01-10

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD2000402）；农业关键核心技术攻关项目（HBNYHXGG2023-2）

作者简介：李 强，研究方向为智能农业装备。E-mail：1011143882@qq.com

*通信作者：丁幼春，博士，教授，研究方向为智慧农业技术与装备。E-mail：kingbug163@163.com

识别开发的玉米播种机排种监测系统，可在发现排种盘缺种时，及时调整排种盘转速，补偿缺种问题。陈建国等[13]设计了小麦播量检测系统，建立了小麦种数与电容积分的关系模型，实现小麦播种检测。解春季等[14]利用激光传感器和透明板设计玉米播种监测装置，具有一定的抗粉尘能力，并提出播种参数监测方法，提高对双粒重叠种子监测的准确率。上述的传感装置与监测系统不适用于粉尘影响下对油菜播种检测的情况。视觉检测法适用于精量播种检测，可以分析获得种子下落状态、落种速度、种子粒径等信息，但镜头易受粉尘遮挡，一般应用于实验室环境中。压电检测法具有较高的灵敏度，但粉尘易累积在压电感应器件上，导致检测灵敏度下降。电容检测法抗污染能力强，但油菜籽粒径小，在低频排种下检测分辨力不足，难以在粉尘影响下对油菜播量进行精量监测。光电检测法感应光线具有一定的穿透能力，可以在一定粉尘环境中实现对油菜籽的监测，但仍需防止粉尘遮挡光电感应器件。

为此，基于课题组光电式油菜种子流检测研究，设计了一种油菜播种机除尘式播量监测系统，并对其进行试验，以期为实现粉尘环境下油菜种子流监测提供参考。

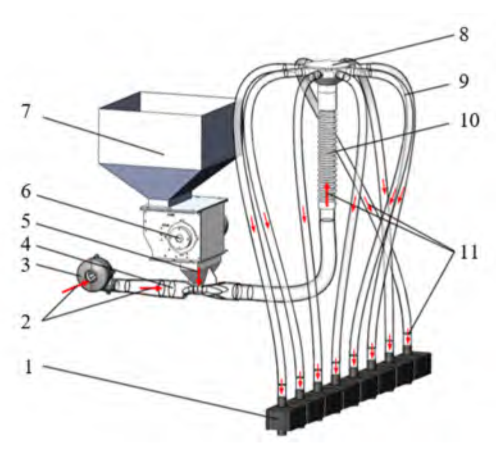
## 1 除尘式油菜种子流检测装置整体结构与工作原理

### 1.1 检测装置粉尘来源分析

油菜气送式直播机使用的排种系统为油菜气送式集排器，其主要由风机、种箱、文丘里管、供种装置、波纹管、分配装置、导种软管等组成[3]。在检测装置对油菜气送式直播机进行播量监测时，粉尘是影响监测准确率的关键因素。其来源一方面是直播机在土壤干燥的田间进行作业时，随着旋耕部件开始工作，对土壤进行粉碎、抛撒，细小的土壤颗粒被带入空中形成大量粉尘，由风机进风口进入排种系统；另一方面，种箱中未清理的粉尘随着油菜籽从供种装置进入排种系统中。粉尘在气流作用下在文丘里管内与供种装置排出的油菜籽混合并随着气流经过波纹管、分配装置、导种软管等结构，进入检测装置导种管入口，如图1所示。

### 1.2 检测装置整体结构

课题组前期基于薄面激光、“LED（Light Emitting Diode）灯珠+窄缝”等产生感应光层方式，设



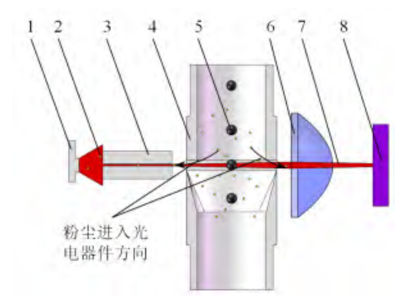

注：1. 油菜种子流检测装置；2. 粉尘；3. 风机；4. 文丘里管；5. 油菜籽；6. 供种装置；7. 种箱；8. 分配装置；9. 导种软管；10. 波纹管；11. 混合后油菜籽、粉尘。

图1 油菜气送式集排器播种监测过程中粉尘来源

Fig. 1 Dust sources during the monitoring process of pneumatic rapeseed seeder sowing

计了油菜、小麦等作物种子流检测装置[8, 15]。种子流检测原理为：当种子流穿过感应光层时会对光层产生局部遮挡，从而减小硅光电池上的光强，引起硅光电池电压变化。信号调理系统对微小电压变化信号进行滤波、二次放大、二极管整流、电压比较、光耦隔离等处理，最终转换成稳定脉冲信号被单片机识别为种子粒数。种子流感应结构主要包括LED阵列光源、窄缝结构、导种管、凸透镜、硅光电池。在油菜籽实际检测过程中，感应光层厚度（凸透镜上光的厚度）以1～2 mm为宜，为保证感应光层不被遮挡，导种管光路通道（导种管两侧用于使感应光层穿越的矩形通道，简称光路通道）宽度被确定为3 mm，因此导种管呈现不封闭状态，粉尘可通过光路通道污染光电感应器件。粉尘影响光电感应器件如图2所示。

如图2所示，由于检测装置内部结构的不封闭

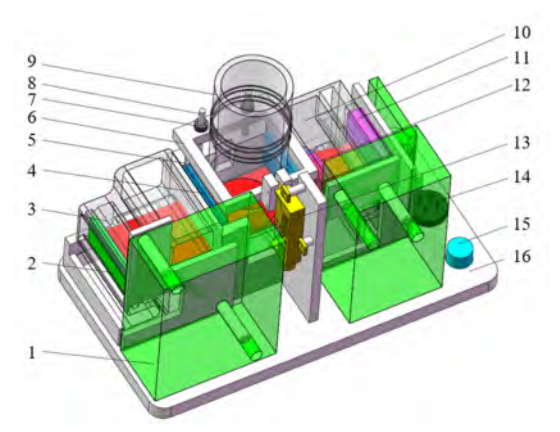



注：1. LED阵列光源；2. 粉尘；3. 窄缝结构；4. 导种管；5. 油菜籽；6. 凸透镜；7. 感应光层；8. 硅光电池。

图2 粉尘影响光电感应器件原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of dust affecting photoelectric sensing devices

性，在气流扰动与静电作用下，粉尘易通过光路通道，吸附于光电感应模块表面。导致传感光强减弱，硅光电池输出信号幅值变化减小，检测装置灵敏度下降，检测准确率降低。为提高检测装置的抗尘能力，设计的除尘式油菜种子流检测装置整体结构如图3所示，主要由导种管、LED光源发射模组、硅光电池接收模组、电源开关、信号调理系统、步进电机-丝杆机构、透明防尘板及举升平台、除尘布等组成。




注：1. 信号调理系统；2. LED阵列光源；3. LED光源支架；4. 除尘布；5. 透明防尘板；6. 举升平台；7. 滑动直线轴承；8. 导向杆；9. 导种管；10. 硅光电池支架；11. 硅光电池；12. 凸透镜；13. 步进电机-丝杆机构；14. 航空插头；15. 电源开关；16. 装置底座。

图3　除尘式油菜种子流检测装置结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of dust removal rapeseed flow detection device

### 1.3 检测装置防尘除尘原理

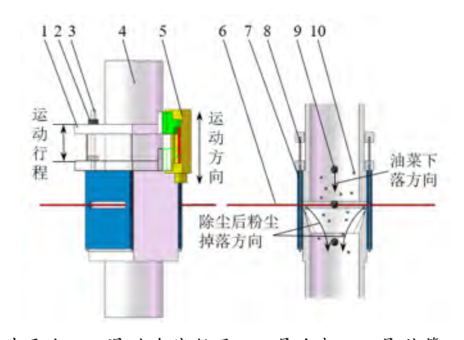
检测装置防尘除尘原理可分为防止导种管内粉尘影响光电感应器件及对透明防尘板被粉尘影响区域进行除尘两部分。

防尘原理：感应光层通过导种管光路通道穿越导种管，当导种管有粉尘通过时，粉尘亦可通过光路通道进入装置内部。因此，使用两块透明防尘板放置于导种管光路通道两侧，隔开光电感应器件与导种管，防止粉尘吸附于感应模块表面。透明防尘板具有良好的透光性，对感应光层削弱影响可忽略不计。

除尘原理：处理器通过定时采集硅光电池实际电压值，当粉尘覆盖在透明防尘板感应光层区域导致实际电压值低于设定阈值时，立即启动除尘机构。电机为丝杆机构提供动力，驱动滑块上下运动。滑块与举升平台连接，当滑块运动时，由举升平台带动透明防尘板运动，透明防尘板与除尘布进行相互摩擦，从而实现透明防尘板粉尘的清除。

## 2　除尘式检测装置主要结构设计与参数分析

防尘除尘机构组成与工作原理如图4所示，其主要由除尘布、透明防尘板、滑动直线轴承、导向杆、举升平台、步进电机-丝杆机构等组成。除尘布恰好绕开导种管光路通道范围，因此除尘布不会遮挡感应光层。透明防尘板完全遮挡导种管光路通道，粉尘与油菜籽均无法通过导种管光路通道进入检测装置其他区域。粉尘附着在透明防尘板后，随着除尘机构的工作，透明防尘板上的粉尘一部分转而附着到除尘布上；另一部分顺着导种管内壁掉落至装置外。




注：1. 举升平台；2. 滑动直线轴承；3. 导向杆；4. 导种管；5. 步进电机-丝杆机构；6. 感应光层；7. 除尘布；8. 透明防尘板；9. 油菜籽；10. 粉尘。

图4　检测装置的防尘除尘机构工作原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the working principle of the dust proof and dust removal mechanism of the detection device

### 2.1 透明防尘板尺寸设计

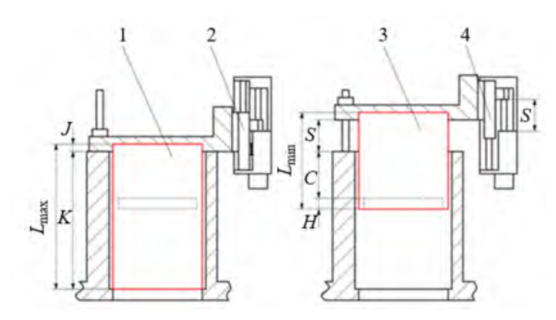
透明防尘板运动行程是保证除尘效果的关键因素。为保证除尘机构效果，有效清除透明防尘板上透光区域附着的粉尘，需确定透明防尘板运动行程。经前期试验，运动行程不低于7.5 mm时，能较为干净地清除透明防尘板透光区域的粉尘，最终将透明防尘板运动行程确定为8 mm。

为保证透明防尘板在除尘过程中，导种管光路通道的密封性并避免防尘板与装置其他部件冲突，对透明防尘板的长度进行设计。透明防尘板的两处极限位置如图5所示。

根据图5可以得到透明防尘板最大长度与最小长度计算，如公式（1）所示。

$$\begin{cases} L_{\max} = K + J \\ L_{\min} = J + S + C + H \end{cases} \tag{1}$$

考虑装置结构紧凑性，取装置底座内部高度$K$=30 mm，透明防尘板嵌入举升平台深度$J$=2 mm，




注:1. 透明防尘板恰好触底时位置; 2. 滑块处于最低处位置; 3. 透明防尘板恰好完全遮挡光路通道位置; 4. 滑块处于最高处位置。$L_{max}$为理论透明防尘板长度最大值,mm; $L_{min}$为理论透明防尘板长度最小值,mm; $J$为透明防尘板嵌入举升平台深度,mm; $K$为装置底座内部高度,mm; $H$为光路通道高度,mm; $C$为光路通路上端与底座上端的距离,mm; $S$为滑块行程,mm。

图5 除尘式油菜种子流检测装置的透明防尘板长度与滑块位置关系

Fig. 5 Relationship between the length of the transparent dust proof plate and the position of the slider in the dust removal rapeseed flow detection device

光路通路上端与底座上端的距离$G$=11 mm，并将滑块行程$S$=8 mm与光路通道宽度$H$=3 mm代入公式（1）计算得，透明防尘板长度24 mm<$L$<32 mm。选择透明防尘板长度为最大值与最小值的平均值，取$L$=28 mm。

## 2.2 硅光电池实际电压与检测准确率关系分析

为保证检测装置能长期处于高性能状态下工作，同时减少能耗，除尘机构只在检测性能下降到一定程度时才启用。为量化粉尘对检测性能的影响，通过建立硅光电池实际电压与检测性能的关系模型，为后续评判检测装置检测性能提供参考依据。使用示波器观察，LED光源照射硅光电池时，硅光电池产生电压差为180～220 mV。油菜种子下落产生的偏置电压为0.6～7 mV。为提高后续判断粉尘影响的分辨率和准确性，使用电压放大器AD620对LED光源照射硅光电池时的电压进行放大。放大倍数通过外部增益控制电阻$R_G$来改变。$R_G$的计算如公式（2）所示。

$$\begin{cases} R_G = \dfrac{49.4\ \text{k}\Omega}{G - 1} \\ G = \dfrac{V_o}{V_i} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$G$为放大倍数；$V_o$为目标输出电压，V；$V_i$为输入电压，V。

本检测装置使用单片机（STM32F103C8T6）的电压数模转换器为12位逐次逼近型的模拟数字转换器，可采集的电压范围为0～3.3 V。不同光源与硅光电池在性能上存在些许差异，可通过使用可调电阻来适应这些差异。调节合适的放大倍数，将硅光电池电压信号放大为2.95～3.0 V。由公式（2）可知，放大倍数越小，所需外部增益控制电阻越大。将$V_{omin}$=2.95 V，$V_{imax}$=0.22 V代入公式（2），得到$R_{Gmax}$=3 949 Ω。选择量程为5 000 Ω的可调电阻，以满足使用需要。

SLY-C微电脑自动数粒仪（简称数粒仪）可提供排种频率0～40 Hz的油菜种子流，通过种子流引导管将数粒仪出种口与检测装置入种口连接，接种杯放置于检测装置下方用于收集油菜籽，监测终端用于显示检测装置的数据信息。通过调整电阻大小，将硅光电池原始电压放大至目标区间内，从终端显示屏观察得到未受粉尘影响下的初始电压为2.98 V。调节数粒仪旋钮使排种频率为10～40 Hz，10 Hz为一个频率梯度，共4个频率水平等级。在各频率水平下，在透明防尘板上均匀涂上不同量的粉尘用于改变硅光电池所受光强，通过监测终端显示屏查看受粉尘影响下的实际电压，以初始电压的3%作为一个电压梯度，开展100%～55%共15个电压水平等级的台架试验，在每个电压水平下排种30 s，结束后统计准确率。试验现场如图6所示，试验结果如图7所示。




注:1. 接种杯; 2. 播种监测终端; 3. 油菜种子流检测装置; 4. 种子流引导管; 5. SLY-C微电脑自动数粒仪。

图6 除尘式油菜种子流检测装置的台架试验现场

Fig. 6 Bench test site of dust removal rapeseed flow detection device

试验结果表明，在10～40 Hz排种频率下，在相同实际电压与初始电压比值时，随着排种频率增加，检测准确率逐渐降低。在各排种频率下，准确率均随实际电压与初始电压比值的降低而降低。原

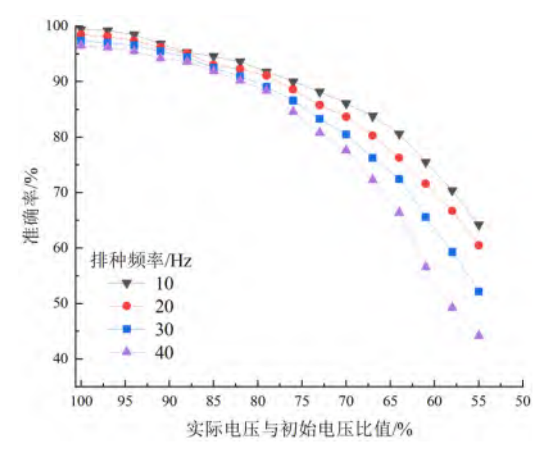



图7　除尘式油菜种子流检测装置的检测准确率随实际电压与初始电压比值变化曲线图

Fig. 7　Detection accuracy of the dust-removal rapeseed flow detection device changes with the ratio of actual voltage to initial voltage

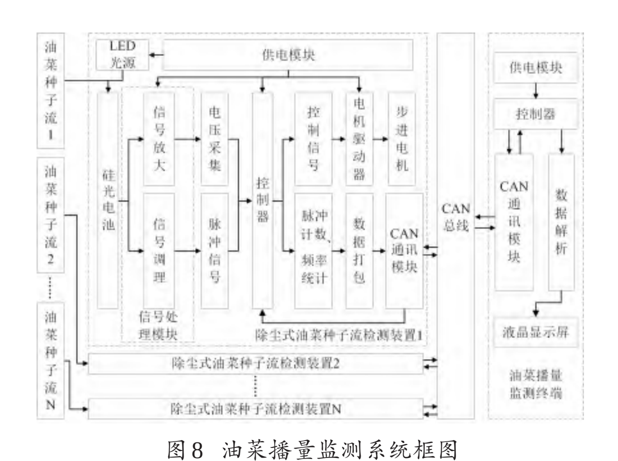



图8　油菜播量监测系统框图

Fig. 8　Block diagram of rapeseed seeding rate monitoring system

因是粉尘影响感应光层的光强，当感应光层的光强减小时，颗粒较小的油菜籽通过感应光层时，硅光电池产生的电压变化经二级放大后仍低于比较器的比较电压，从而不能产生脉冲信号。当实际电压与初始电压比值高于82%时，各频率下检测准确率均高于90%。为保证检测装置在田间检测准确率不低于90%，将初始电压的82%作为启动除尘控制的阈值，并通过测试，将除尘运动速度设置为51 mm/min，完成一次除尘工作用时为13.6 s，实际电压能恢复至初始电压97%以上。

## 3　播种质量监测系统

### 3.1　监测系统结构设计

在监测通信方式上，点对点通信方式在多行通信时存在利用率低、线路复杂、不易扩展等问题[16]。控制局域网（Controller Area Network, CAN）现场总线技术具有实时性高、抗干扰能力强、可靠性高、可方便扩充节点数等优点[17]，正逐步应用于收获、施肥、播种等[18-20]方面。随着对直播机作业监测需求的发展，开发相应总线监测系统已成为智能化农机装备研究的热点。

本研究基于CAN总线特点，设计一种油菜播量监测系统，如图8所示。该系统主要包括除尘式油菜种子流检测装置与播量监测显示终端。

监测终端主要由液晶显示屏、微控制器、通讯模块、供电模块构成，实现对检测装置播种信息接收、存储与显示，并可通过监测终端向检测装置发送清理指令，实现对整个监测系统的数据清零。监测系统通信协议参考课题组问询-应答通信协议[21]，经过测试，在本监测系统中，单行问询与应答数据传输总时间为3 ms，在设定监测行数为$N$行时，轮询1周周期为3×$N$ ms。本研究后续针对8行油菜直播机进行试验，轮询1周周期为24 ms，满足通信实时性要求。

### 3.2　检测与除尘程序流程

检测装置软件流程图如图9所示，检测与除尘程序首先进行初始化，主要包括定时器、引脚功能以及变量初始化，其中定时器T0与T1定时时间分别设定为0.1 s与1 s。在定时器T0中断程序中，通过前10次连续采集的电压值取平均值作为初始电压值，并在之后持续采集实际电压值。种子流计数子程序用于记录脉冲个数。定时器T1中断程序用于更新播种总数和排种频率，并将播种数据放入数据包中。CAN接收中断程序中，若接收到清零指令后，完成数据清零并返回对应数据包，否则向监测终端返回播种信息数据包。在主程序中，在完成标定初始电压值后，不断判断实际电压值大小，在实际电压值低于设定除尘启动阈值即初始电压值82%时，输出电机控制信号，完成除尘工作。

## 4　试验与结果分析

### 4.1　田间作业粉尘流量测定

为探明气送式油菜直播机田间实际播种作业时粉尘流经检测装置情况，为台架试验提供粉尘流量数据支持，于湖北省襄阳市开展了田间粉尘流量测定试验。本研究以气送式油菜直播机为试验对象，作业宽幅2.3 m，田间正常作业速度为2.8～4.6 km/h。其他试验仪器与装置：CaseTM1404型拖

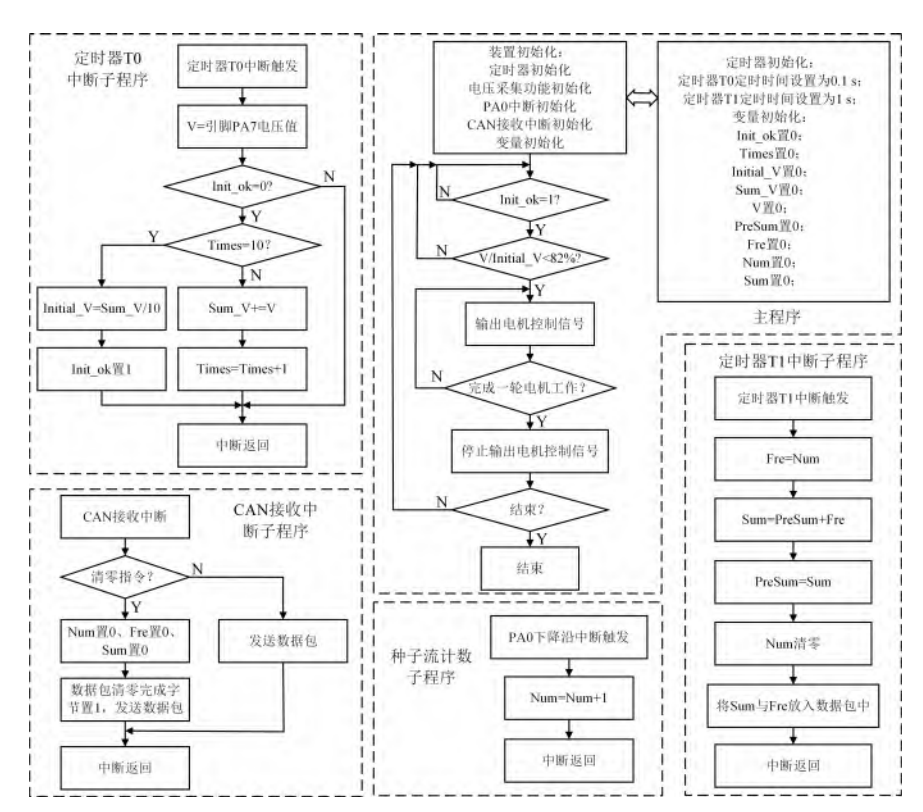



图9 除尘式油菜种子流检测装置的检测与除尘程序流程图

Fig. 9 Flow chart of detection and dust removal procedures of dust removal rapeseed flow detection device

拉机、精密电子秤（1 mg）、米尺、秒表、取样袋等。

试验时气送式油菜直播机在3个适宜速度下进行试验，分别为慢I挡、慢II挡、慢III挡，对应作业速度分别为2.8、3.8、4.6 km/h。将粉尘采集点设置于气送式油菜排种系统导种管末端，每个挡位下作业50 m，使用取样袋收集作业过程产生的粉尘，试验结束后使用精密电子秤称量取样袋中的粉尘质量，重复3次，取平均值利用粉尘质量与作业时间的比值计算每个挡位下的平均粉尘流量，结果如表1所示。

**表1 油菜气送式直播机的不同挡位粉尘流量测定结果**

Table 1 Measurement results of dust flow rate at different gears of rapeseed air-assisted direct seeding machine

| 试验号 | 挡位 | 时间/s | 粉尘质量/mg | 平均粉尘流量/(mg/s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 慢I挡 | 64 | 16 124 | 252 |
| 2 | 慢II挡 | 48 | 15 692 | 327 |
| 3 | 慢III挡 | 40 | 15 445 | 386 |

试验后，通过在3个挡位下继续作业，获取足够量的粉尘用于台架试验。

## 4.2 台架试验要求

台架试验所用材料为油菜籽，试验所用主要仪器及设备为油菜气送式集排器、油菜种子流检测装置、播种监测终端、供种装置电机转速调控器、风机、针筒注射器、漏斗、接种袋、取样袋、直流电机、塑胶软管和秒表。同时，利用塑封袋、数粒仪和标签纸等对检测的结果进行记录，试验台架如图10所示。

本研究使用供种装置电机转速调控器为课题组研制闭环控制电机调控器[22]。电机调控精度为




注：1. 接种袋；2. 油菜种子流检测装置；3. 播种监测终端；4. 油菜气送式集排器；5. 直流电机；6. 供种装置电机转速调控器；7. 电机驱动器；8. 针筒注射器；9. 漏斗；10. 风机。

图10 除尘式油菜播量监测系统的播量监测试验台架

Fig. 10 Seeding rate monitoring test bench for dust removal rapeseed seeding rate monitoring system

98%，可通过设定目标电机转速与工作时间来控制供种装置进行试验。

为在台架试验时模拟田间工作时气送式排种系统排种时油菜籽携带粉尘的情况，将前期预试验时收集的粉尘装入针筒注射器中，通过调节针筒注射器推杆推动速度来改变风机吸入的粉尘流量，可以实现粉尘流量调节范围为0～600 mg/s，10 s内平均粉尘流量误差在20 mg/s内。

油菜直播机作业时，计算所需的排种频率如公式（3）所示。

$$f = \frac{250 \times V \times L \times M}{9 \times n \times m} \tag{3}$$

式中：$f$为排种系统的排种频率，Hz；$V$为播种机行进速度，km/h；$L$为播种机幅宽，m；$M$为播量，kg/hm$^2$；$n$为播种机工作行数；$m$为种子的千粒质量，g。

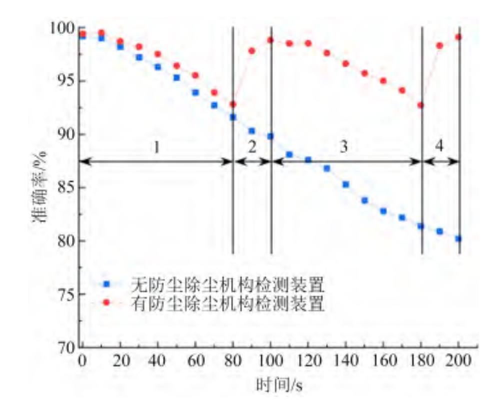
根据《2022年湖北省油菜秋冬种生产技术指导意见》，油菜农艺要求的播量为3～4 kg/hm$^2$，结合播种机作业速度2.8～4.6 km/h，作业行数为8行，作业幅宽2.3 mm，试验使用油菜籽品种为华油杂62，平均千粒质量4.67 g。在播种机正常工作的速度区间范围内，符合播种密度要求的排种频率为14.4～31.5 Hz。

## 4.3 防尘除尘机构对检测准确率影响试验与结果分析

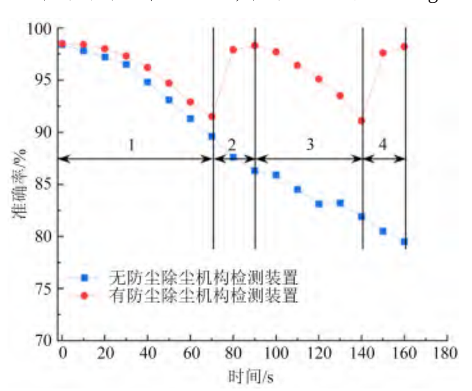
试验目的在于对比有无防尘除尘检测装置在粉尘影响下的检测性能。将有防尘除尘检测装置和无防尘除尘检测装置各一个分别固定于油菜气送式集排器排种口下方合适位置，通过软管连接检测装置入种管与集排器出种口，接种盒置于传感器出种管正下方用于收集排出的油菜种子。其他6行排种口使用软管接入取样袋中，用于收集粉尘。

对比试验前，首先检验粉尘对检测装置计数的影响。种箱内不放入油菜籽，风机正常工作，分别将粉尘流量控制在252、327和386 mg/s这3个等级下，各测试10 s，每个等级下测试3次，测试结果表明：在252～386 mg/s粉尘流量下，检测装置计数始终为0，检测装置不会将粉尘误计为油菜籽。

台架试验时，对应慢I挡、慢II挡、慢III挡机具速度，分别设定供种装置电机转速为3、7和12 r/min，并将粉尘流量控制在对应速度下。在各转速下，每隔10 s进行一次播量检测数据的统计（第0秒检测准确率数据为不加入粉尘，排种10 s时的检测准确率），对比试验结果如图11所示。




a. 平均排种频率12.4 Hz，平均粉尘流量252 mg/s




b. 平均排种频率22.8 Hz，平均粉尘流量327 mg/s

c. 平均排种频率36.3 Hz，平均粉尘流量386 mg/s

注：1. 除尘机构未工作时第1次准确率衰减期；2. 除尘机构工作时第1次准确率上升期；3. 除尘机构未工作时第2次准确率衰减期；4. 除尘机构工作时第2次准确率上升期。

图11 油菜种子流检测装置有无防尘除尘机构的检测准确率对比试验

Fig. 11 Comparative test on detection accuracy of rapeseed flow detection device with or without dust proof and dust removal mechanism

在试验过程中，观察到在平均粉尘流量为252 mg/s时，除尘机构分别在第80和180秒开始工作，在平均粉尘流量为327 mg/s时，除尘机构分别在第70和140秒开始工作，而在平均粉尘流量为386 mg/s时，除尘机构分别在第50和110秒开始工

作。每次除尘工作中，滑块均下降到最底端后返回原位，用时均在14 s左右，与程序设定内容一致。试验结果表明，在平均排种频率12.4～36.3 Hz、平均粉尘流量252～386 mg/s时，无防尘除尘检测装置在各排种频率下检测准确率均呈现随时间下降趋势，且检测性能不会自主恢复。随着排种频率增加时，检测装置检测准确率逐渐降低，且检测准确率在两个除尘周期后检测准确率分别不高于80.2%、79.5%和73.8%。

在没有进行除尘时，有防尘除尘检测装置在各排种频率下检测准确率随时间呈下降趋势。在检测准确率下降到设定阈值后，随着除尘机构工作，检测装置检测性能恢复至初始状态。在整个试验期间，排种频率分别为12.4、22.8、36.3 Hz下的检测准确率分别不低于92.7%、91.1%和90.2%，除尘机构工作平均周期分别为100、80和65 s。在一个除尘周期中，平均检测准确率分别不低于96.9%、95.7%和93.6%。

## 4.4 播量监测台架试验

试验目的在于评估油菜播种监测系统多行监测的稳定性、可靠性及准确性。将8个检测装置分别固定于气送式集排器排种口下方合适位置，通过软管连接排种口与检测装置入种口，并使用接种盒收集出种口的油菜籽。试验时，为使排种系统工作于正常排种频率区间范围内，控制供种装置电机转速分别为3、7和12 r/min，每个电机转速下排种时间分别设定为对应转速下的两个除尘机构平均工作周期，即200、160和130 s。同时利用针筒注射器控制粉尘流量在对应范围内。每次试验后通过人工计数统计接种盒内的油菜籽粒数，并记录监测终端上的监测值；剔除试验过程中出现的异常数据，在当时的转速下重新开始试验，结果如表2所示。

**表2 除尘式油菜播量监测系统在供种装置电机不同转速下的播量监测结果**

Table 2 Seeding rate monitoring results of the rapeseed seeding rate monitoring system at different speeds of the seed supply device motor

| 传感装置序号 | 电机转速3 r/min | | | | 电机转速7 r/min | | | | 电机转速12 r/min | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 监测播量/粒 | 实际播量/粒 | 平均排种频率/Hz | 监测准确率/% | 监测播量/粒 | 实际播量/粒 | 平均排种频率/Hz | 监测准确率/% | 监测播量/粒 | 实际播量/粒 | 平均排种频率/Hz | 监测准确率/% |
| 1 | 2 207 | 2 285 | 11.4 | 96.6 | 3 401 | 3 568 | 22.3 | 95.3 | 4 467 | 4 788 | 36.8 | 93.3 |
| 2 | 2 178 | 2 241 | 11.2 | 97.2 | 3 158 | 3 310 | 20.7 | 95.4 | 4 472 | 4 835 | 37.2 | 92.5 |
| 3 | 2 633 | 2 740 | 13.7 | 96.1 | 3 499 | 3 645 | 22.8 | 96.0 | 4 411 | 4 733 | 36.4 | 93.2 |
| 4 | 2 493 | 2 583 | 12.9 | 96.5 | 3 320 | 3 488 | 21.8 | 95.2 | 4 249 | 4 540 | 34.9 | 93.6 |
| 5 | 2 359 | 2 442 | 12.2 | 96.6 | 3 574 | 3 731 | 23.3 | 95.8 | 4 333 | 4 639 | 35.7 | 93.4 |
| 6 | 2 302 | 2 378 | 11.9 | 96.8 | 3 745 | 3 917 | 24.5 | 95.7 | 4 404 | 4 756 | 36.6 | 92.6 |
| 7 | 2 572 | 2 668 | 13.3 | 96.4 | 3 592 | 3 776 | 23.6 | 95.1 | 4 267 | 4 566 | 35.1 | 93.4 |
| 8 | 2 407 | 2 494 | 12.5 | 96.5 | 3 529 | 3 711 | 23.2 | 95.1 | 4 501 | 4 882 | 37.6 | 92.2 |

由表2可知，油菜气送式集排器排种频率为11.2～37.6 Hz时，随着排种频率增加，检测装置监测准确率逐渐降低，整个试验过程中，单行检测准确率不低于92.2%。整个试验过程中没有出现种子堵塞和种子流通不畅现象，也没有发生数据传输故障。

## 4.5 田间试验

为验证油菜播种监测系统在田间复杂工作状况下的工作稳定性与监测准确性，于2023年10月22日在湖北省襄阳市开展播种监测田间试验。

试验设备为：CaseTM1404型拖拉机（动力输出功率≥103 kW，四轮驱动），油菜直播机、油菜气送式集排器、油菜播种监测系统等。

在种箱中放入适量的油菜种子，将8个检测装置固定在播种机上，通过接种袋收集输种管出口排出的油菜种子，通过软管连接排种口与检测装置入种口，并使用接种袋收集出种口的种子，便于后续统计实际播种量。监测终端置于拖拉机后方的播种机上，用于显示各装置的检测播种量。试验现场如图12所示。

根据油菜播种机正常作业速度，开展慢I挡、慢II挡、慢III挡3个拖拉机行进速度下的田间播种试验，调控供种装置电机转速，使得试验过程中的排种频率范围在对应行驶速度要求的排种频率区间内。每次试验播种距离100 m，记录播种时间和监测系统显示屏上的各行排种总量。每次试验的种子用塑封袋装好并标记，试验结束后进行人工数粒统计各行实际排种量。田间试验结果如表3所示。

田间试验结果表明，在2.8～4.6 km/h的油菜直




注：1. 接种袋；2. 油菜直播机；3. 供种装置电机转速调控器；4. CaseTM1404型拖拉机；5. 油菜气送式集排器；6. 播种监测终端；7. 油菜种子流检测装置。

图12　除尘式油菜播量监测系统田间试验

Fig. 12　Field test of dust removal rapeseed seeding rate monitoring system

**表3　除尘式油菜播量监测系统田间试验结果**

Table 3　Field test results of dust removal rapeseed seeding rate monitoring system

| 挡位(速度)/(km/h) | 排种时间/s | 传感装置序号 | 监测播量/粒 | 实际播量/粒 | 监测准确率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 慢I挡(2.8) | 131 | 1 | 1 862 | 1 938 | 96.1 |
| | | 2 | 1 969 | 2 043 | 96.4 |
| | | 3 | 2 095 | 2 187 | 95.8 |
| | | 4 | 2 124 | 2 213 | 96.0 |
| | | 5 | 2 149 | 2 253 | 95.4 |
| | | 6 | 1 980 | 2 069 | 95.7 |
| | | 7 | 2 178 | 2 271 | 95.9 |
| | | 8 | 2 051 | 2 135 | 96.1 |
| 慢II挡(3.8) | 98 | 1 | 1 962 | 2 048 | 95.8 |
| | | 2 | 2 066 | 2 166 | 95.4 |
| | | 3 | 2 025 | 2 125 | 95.3 |
| | | 4 | 2 307 | 2 411 | 95.7 |
| | | 5 | 1 989 | 2 097 | 94.9 |
| | | 6 | 2 100 | 2 205 | 95.2 |
| | | 7 | 2 176 | 2 283 | 95.3 |
| | | 8 | 1 927 | 2 018 | 95.5 |
| 慢III挡(4.6) | 77 | 1 | 2 139 | 2 295 | 93.2 |
| | | 2 | 2 091 | 2 210 | 94.6 |
| | | 3 | 2 143 | 2 287 | 93.7 |
| | | 4 | 2 001 | 2 117 | 94.5 |
| | | 5 | 2 178 | 2 340 | 93.1 |
| | | 6 | 2 080 | 2 218 | 93.8 |
| | | 7 | 2 234 | 2 394 | 93.3 |
| | | 8 | 2 197 | 2 333 | 94.2 |

播机正常作业速度，14.8～31.1 Hz的排种频率范围时，监测系统对油菜播种量监测准确率保持在93.1%以上。在符合播种要求的排种频率下，播种监测系统在田间工作稳定可靠。

## 5　结　论

本研究针对气送式油菜直播机作业过程中粉尘影响种子流检测性能、监测系统难以适应不同幅宽播种行数等问题，设计了油菜播种机除尘式播量监测系统，开展了粉尘影响下，有无防尘除尘检测装置对比试验与监测系统播量监测性能试验，并在气送式油菜直播机上开展了田间试验对系统的准确性和可靠性进行验证。

1）设计了防尘除尘机构，通过透明防尘板将光电感应器件与导种管隔开，粉尘与油菜籽均无法通过导种管光路通道至检测装置其他部分。结合步进电机-丝杆机构带动透明防尘板与除尘布进行摩擦运动清除透明防尘板上已有粉尘，通过分析与试验确定透明防尘板尺寸、除尘启动阈值等关键参数。

2）有无防尘除尘检测装置对比台架试验中，在平均排种频率12.4～36.3 Hz，平均粉尘流量252～386 mg/s时，有防尘除尘检测装置检测准确率不低于90.2%，单个除尘周期内的平均检测准确率不低于93.6%，无防尘除尘检测装置检测准确率在两个除尘周期后分别不高于80.2%、79.5%和73.8%。播量监测台架试验中，在平均排种频率不高于37.6 Hz时，播量监测准确率不低于92.2%。田间播种试验表明，在2.8～4.6 km/h的油菜直播机正常作业速度下，田间排种频率为14.8～31.1 Hz，播量监测准确率不低于93.1%。

除尘布在长时间使用后，由于粉尘的污染，除尘功能减弱，需要清理或更换新的除尘布。未来可设计对除尘布自清洁机构、设计便于更换的除尘布安装结构或选用不粘灰的除尘布材料，并可根据排种频率设置动态除尘阈值，提供除尘机构的工作效率。基于CAN总线技术，监测系统将油菜直播机无人作业导航位置信息、播种与施肥监测数据信息等结合在一起，为田间播种施肥一体状态图提供支持。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献：

[1] 沈金雄, 傅廷栋. 我国油菜生产、改良与食用油供给安全[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(1): 1-8.
SHEN J X, FU T D. Rapeseed production, improvement and edible oil supply in China[J]. Journal of agricultural science and technology, 2011, 13(1): 1-8.

[2] 韩飞, 李燕妮, 李曼. 精密播种机排种量监测系统设计[J]. 现代食品, 2017(4): 118-120.
HAN F, LI Y N, LI M. Design for precision seeder meter-

ing quantity monitoring system[J]. Modern food, 2017(4): 118-120.

[ 3 ] WANG L, CONG J L, REN N, et al. Influence of surface slope on the seeding performance of air-assisted centralized metering device for rapeseed based on numerical simulation[J]. Computers and electronics in agriculture, 2024, 218: ID 108734.

[ 4 ] 周利明, 王书茂, 张小超, 等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 16-21.
ZHOU L M, WANG S M, ZHANG X C, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2012, 28(13): 16-21.

[ 5 ] MANGUS DL, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers and electronics in agriculture, 2017, 142: 314-325.

[ 6 ] MEYER ZU HOBERGE S, HILLERINGMANN U, JOCHHEIM C, et al. Piezoelectric sensor array with evaluation electronic for counting grains in seed drills[C]// IEEE Africon'11. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2011: 1-6.

[ 7 ] 孙国峻, 张金然, 徐勇, 等. 基于PVDF双压电薄膜的油菜播种监测系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 601-607.
SUN G J, ZHANG J R, XU Y, et al. Design and experiment of rapeseed sowing monitoring system based on PVDF bi-piexoelectric film[J]. Journal of Hunan agricultural university (natural sciences), 2022, 48(5): 601-607.

[ 8 ] 丁幼春, 朱凯, 王凯阳, 等. 薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 12-20.
DING Y C, ZHU K, WANG K Y, et al. Development of monitoring device for medium and small size seed flow based on thin surface laser-silicon photocell[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(8): 12-20.

[ 9 ] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions[J]. Computers and electronics in agriculture, 2019, 162(C): 543-551.

[10] TAGHINEZHAD J, ALIMARDANI R, JAFARI A. Design a capacitive sensor for rapid monitoring of seed rate of sugarcane planter[J]. Agricultural engineering international, 2013, 15(4): 23-29.

[11] GIERZ Ł, PASZKIEWICZ B K. PVDF piezoelectric sensors for seeds counting and coulter clogging detection in sowing process monitoring[J]. Journal of engineering, 2020, 2020: ID 2676725.

[12] BORJA A A, AMONGO R M C, SUMINISTRADO D C, et al. A machine vision assisted mechatronic seed meter for precision planting of corn[C]// 2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2018: 183-187.

[13] 陈建国, 李彦明, 覃程锦, 等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 66-74.
CHEN J G, LI Y M, QIN C J, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat-planter seeding quantity[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(1): 66-74.

[14] 解春季, 杨丽, 张东兴, 等. 基于激光传感器的播种参数监测方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 140-146.
XIE C J, YANG L, ZHANG D X, et al. Seeding parameter monitoring method based on laser sensors[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(3): 140-146.

[15] 徐春保, 刘靖怡, 苏清茂, 等. 薄面光折射式小麦种子流多通道并行检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 81-91.
XU C B, LIU J Y, SU Q M, et al. Design and experiment of the wheat seed flow multi-channel parallel detection device with thin-surface light refraction[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38 (18): 81-91.

[16] CHEN J C, ZHANG H, PAN F, et al. Control system of a motor-driven precision no-tillage maize planter based on the CANopen protocol[J]. Agriculture, 2022, 12(7): ID 932.

[17] PARAFOROS D S, SHARIPOV G M, GRIEPENTROG H W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review[J]. Computers and electronics in agriculture, 2019, 163: ID 104863.

[18] HE X T, DING Y Q, ZHANG D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: Design and laboratory experiment[J]. Computers and electronics in agriculture, 2019, 162(C): 318-327.

[19] ALA-ILOMÄKI J, SALMIVAARA A, LAUNIAINEN S, et al. Assessing extraction trail trafficability using harvester CAN-bus data[J]. International journal of forest engineering, 2020, 31(2): 138-145.

[20] CHEN K K, ZHAO B, ZHOU L M, et al. Real-time missed seeding monitoring planter based on ring-type capacitance detection sensor[J]. INMATEH-agricultural engineering, 2021: 279-288.

[21] 丁幼春, 张莉莉, 杨军强, 等. 油菜精量直播机播种监测系统传感装置改进及通信设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 19-26.
DING Y C, ZHANG L L, YANG J Q, et al. Sensing device improvement and communication design on sowing monitoring system of precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(14): 19-26.

[22] 胡瑞. 油菜直播机施肥随速控制系统设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
HU R. Design and experiment of speed-dependent fertilizing control system of rapeseed machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

# Design and Test of Dust Removal Seeding Rate Monitoring System for Rapeseed Seeders

LI Qiang[1,2], YU Qiuli[1,2], LI Haopeng[1,2], XU Chunbao[1,2], DING Youchun[1,2*]

（1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*; 2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*）

**Abstract:**

**[Objective]** The pneumatic rapeseed seeder easily inhales the dust generated during live broadcast operations into the seeding pipe, and then releases it along with the rapeseed. Consequently, when monitoring the rapeseed flow, dust interference can affect the flow, detection sensitivity and accuracy. This research aims to develop a dust removal rapeseed seeding rate monitoring system suitable for air-assisted pneumatic rapeseed seeders to improve the transparency and intelligence of the sowing process.

**[Methods]** The monitoring system comprised a dust removal rapeseed seed flow detection device and a sowing monitoring terminal, which could be adjusted for different seeders widths by altering the number of detection devices. The rapeseed stream sensing structure operated on the principle of photoelectric induction. A delicate light layer was generated using an LED light source and a narrow slit structure. The convex lens condenses the light and directed it onto the sensing area of the silicon photovoltaic cell. When the rapeseed seeds pass through the sensing light layer, the silicon photovoltaic cell produced a voltage change signal. The signal converts it into a pulse signal that can be recognized by the microcontroller. A dust removal mechanism was designed by analyzing dust sources in the seeding system during normal field operation of the air-assisted rapeseed seeding machine and understanding the impact mechanism of the dust detection device on the accuracy of rapeseed flow monitoring. This mechanism employed a transparent plate to protect the photoelectric induction device in a relatively enclosed space and used a stepper motor screw mechanism to generate friction between the transparent plate and the dust removal cloth for effective dust removal. The appropriate size of the dust shield was determined by comparing its movement stroke with other structural dimensions of the detection device. The relationship between the silicon photocells voltage and detection accuracy was established through experiments at seeding frequencies of 10–40 Hz. To ensure that the real-time detection accuracy was not less than 90%, the dust removal control threshold was set at 82% of the initial voltage value. In order to prevent congestion and data loss during data transmission and improve the scalability and compatibility of the monitoring system, data transmission between the detection device and the monitoring terminal was implemented based on the CAN2.0A communication protocol. The structural framework and monitoring terminal functions of the rapeseed sowing monitoring system were outlined. Software functions of the detection device were designed to meet the dust removal, communication, and rapeseed flow detection needs. The program execution process of the detection device was explained. In order to provide data support for the dust flow rate that should be controlled at various seeding frequencies during the bench test, experiments were conducted in the field to obtain theoretical data.

**[Results and Discussions]** The comparison bench test of the detection device indicates that with the average seeding frequency ranging from 12.4 to 36.3 Hz and the average dust flow rate ranging from 252 to 386 mg/s, the detection accuracy after two dust removal cycles without a dustproof and dust removal detection device was not higher than 80.2%. The dust detection device with dust removal got an accuracy rate of not less than 90.2%, and the average detection accuracy rate within a single dust removal cycle was not less than 93.6%. The seeding amount monitoring bench test showed that when the average seeding frequency was no higher than 37.6 Hz, the seeding rate monitoring accuracy was not less than 92.2%. Furthermore, the field sowing experiment results demonstrated that at a normal operating speed (2.8–4.6 km/h) of the rapeseed direct seeder, with a field sowing frequency of 14.8–31.1 Hz, the accuracy of sowing quantity monitoring was not less than 93.1%.

**[Conclusions]** The rapeseed sowing quality monitoring system provides effective support for precise detection even when operating in dusty conditions with the pneumatic rapeseed direct seeder. In the future, by integrating positioning data, sowing information, and fertilization monitoring data through CAN bus technology, a comprehensive field sowing and fertilization status map can be created to further enhance the system's capabilities.

**Key words:** rapeseed seed flow detection; seed; dust removal; monitoring system; accurate counting

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (2021YFD2000402); Key Agricultural Core Technology Research and Development Projects (HBNYHXGG2023-2)

**Biography:** LI Qiang, E-mail: 1011143882@qq.com

*__Corresponding author:__ DING Youchun, E-mail: kingbug163@163.com